

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ЭЛЕКТРО- ПЕРЕДАЧ (С ЗАЗЕМЛЕННОЙ ФАЗОЙ)

ЩЕРБАКОВ В. К.

Профессор, доктор технических наук

I.

Свыше 1000 км трехфазных линий электропередач работают в СССР в несимметричном режиме—с заземленной фазой, используя таким образом землю в качестве токопровода. Не предусматривая защиту от грозовых ударов, эти несимметричные трехфазные линии не имеют проводов в заземленной фазе (т. н. система „два провода—земля“).

В общем случае высоковольтные линии с заземленной фазой должны иметь соответственно расположенные на опорах провода и в заземленной фазе для защиты линии от грозовых ударов (Л1). Эти провода могут быть в виде стальных тросов, обычно подвешиваемых над линией только для защиты, или могут быть выполнены из цветного металла, как и провода незаземленных фаз, и в этом случае используются одновременно и для канализации части тока заземленной фазы.

Известные до сего времени способы расчета линий с заземленной фазой имеют в виду лишь двухпроводные трехфазные линии и короткие линии при номинальном напряжении до 35 кв (Л2); эти способы расчета не учитывают емкостных токов линий и не касаются вопроса о короне на линиях с заземленной фазой; не затрагивается также вопрос об определении токов обратной последовательности в генераторах и приемниках электрических систем, имеющих линии с заземленной фазой.

В настоящей работе дается метод и соответствующие формулы электрического расчета общего случая электропередачи с заземленной фазой. Предлагаемый метод расчета учитывает емкостные токи линии и дает возможность сравнительно просто определять токи обратной последовательности в любом элементе электропередачи. В работе даются формулы для подсчета критического напряжения короны и потерь на корону в линиях с заземленной фазой; приведен пример расчета несимметричной электропередачи.

II.

Схема трехфазной линии с заземленной фазой представлена на рис. 1а, возможное расположение проводов на опоре двухцепной линии показано на рис. 1б.

Часть тока заземленной фазы протекает в земле, и поэтому сопротивление этой фазы иное, чем сопротивление двух других фаз. Электрический расчет линии за счет такого неравенства сопротивлений фаз усложняется и, главным образом, по причине затруднений, связанных с определением реактивного сопротивления, которое встречает ток фазы „а“ в земле.

Желая избежать затруднений с определением сопротивления заземленной фазы, — способом, указанным ниже, определяется ток в проводе заземленной фазы, как часть общего тока этой фазы, и в дальнейшем все расчеты связываются только с токами в проводах линии. Симметричные составляющие прямой и обратной последовательности системы токов в проводах целиком определяют искомое падение напряжения в линии; определение составляющей нулевой последовательности в напряжениях фаз линии не имеет смысла, так как токи нулевой последовательности не

могут проникать в приемники электрической мощности через трансформаторы с изолированной нейтралью.

В простейшем случае, когда одиночная петля провод—провод имеет параллельное подключение земли к одной стороне петли (рис. 2), распределение тока

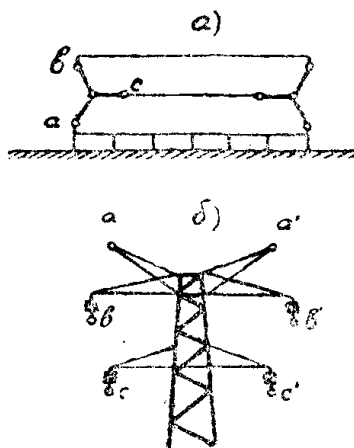


Рис. 1

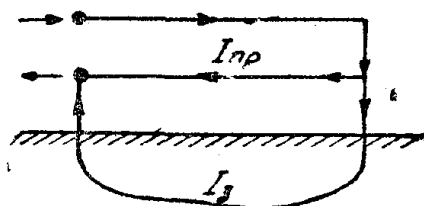


Рис. 2

между заземленной стороной петли и землею, в предположении, что переходное сопротивление заземления равно нулю, определится из соотношения:

$$(I_n + I_z) \cdot R_n + I_n \cdot (R_n + j\omega L_{nn}) + I_z \cdot j\omega M = (I_n + I_z) \cdot R_n + I_z (R_z + j\omega L_{nz}) + I_n \cdot j\omega M, \quad (1)$$

где I_n, I_z и R_n, R_z — соответственно ток и активные сопротивления провода и земли;

L_{nn} — коэффициент самоиндукции петли провод—провод;

L_{nz} — коэффициент самоиндукции петли провод—земля;

M — коэффициент взаимной индукции между контурами: провод—провод и провод—земля.

Из соотношения (1)

$$\frac{I_n}{I_z} = \frac{R_z + j(\omega L_{nz} - \omega M)}{R_n + j(\omega L_{nn} - \omega M)} = \frac{Z_{nz} - 0,5 Z_{nn}}{0,5 Z_{nn}}. \quad (2)$$

Переходя к трехфазной линии с заземленной фазой и рассматривая ток заземленной фазы (фазы „а“) как удвоенный ток нулевой последовательности несимметричной системы, состоящей из токов двух других фаз:

$$\left. \begin{matrix} I_b \\ I_c \end{matrix} \right\},$$

можем написать для токов нулевой последовательности каждой фазы соотношения, подобные (1), откуда после некоторых преобразований получим:

$$\frac{I^{(0)}_n}{I^{(0)}_z} = \frac{Z^{(0)}_a - Z^{(1)}_a}{3Z^{(1)}_a}. \quad (3)$$

Здесь $Z^{(0)}_a$ — полное сопротивление провода фазы „а“ токам прямой последовательности,
 $Z^{(0)}_a$ — полное сопротивление фазы „а“ линии токам нулевой последовательности; $Z^{(0)}_a$ определяется по упрощенным формулам Карсона, предложенным Вагнером и Эвансом, как

$$Z^{(0)}_a = R_a + 0,002965f + j \cdot 0,008682f \lg \frac{D_e}{\sqrt[3]{r_a \cdot D_{12} \cdot D_{13}}} \Omega/km, \quad (4)$$

или ¹⁾

$$Z^{(0)}_a = R_a + (3 + 0,0493) + j\omega (4,6 \lg \frac{D_e^3}{r_a \cdot D_{12} \cdot D_{13}} + 0,5) \cdot 10^{-4} \Omega/km. \quad (5)$$

Здесь R_a — активное сопротивление провода заземленной фазы (фазы „а“);
 r_a — радиус провода фазы „а“;

D_e — глубина залегания оси тока в земле; приближенно по Карсону

$$D_e = 664,1 \sqrt{\frac{\rho}{f}}, \text{ где } \rho \text{ — удельное сопротивление земли, а } f \text{ — частота переменного тока;}$$

D_{12} и D_{13} — расстояния между проводом фазы „а“ и проводами двух других фаз.

При учете влияния соседней цепи, рис. 3,

$$Z^{(0)}_a = R_a + (6 \times 0,0493) + j\omega (4,6 \lg \frac{D_e}{r_a \cdot D_{12} \cdot D_{13}} \cdot \frac{D_e^3}{D_{11}' \cdot D_{12}' \cdot D_{13}'} + 0,5) \cdot 10^{-4} \Omega/km. \quad (6)$$

Для железных (стальных) проводов необходимо еще дополнительно учесть внутреннее индуктивное сопротивление по соответствующим таблицам.

Во многих случаях, когда нет данных относительно проводимости земли, внешнее реактивное сопротивление нулевой последовательности можно принять приближенно:

а) для одноцепных линий $x^{(0)} \approx 3,5 x^{(1)}$,

б) для двухцепных линий $x^{(0)} \approx 5,5 x^{(1)}$,

где $x^{(1)}$ — реактивное сопротивление токам прямой последовательности.

Используя отношение (3), определим ток в проводе (в проводах) заземленной фазы, как

$$I_{a(n)} = I_a \frac{Z^{(0)}_a - Z^{(1)}_a}{3Z^{(1)}_a + (Z^{(0)}_a - Z^{(1)}_a)} = mI_a. \quad (7)$$

III.

Токи в фазах нагрузки в конце электропередачи с заземленной фазой составят несимметричную систему токов, как сумму симметричных систем токов прямой и обратной последовательности. Величина тока обратной последовательности, в согласии с требованиями „Правил технической эксплуатации эл. станций и сетей“, не должна превышать, примерно, 5% от величины тока прямой последовательности и поэтому в практических расчетах вполне допустимо считать трехфазную систему

¹⁾ При $f = 50 \text{ Hz}$

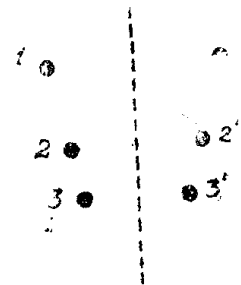


Рис. 3

токов нагрузки симметричной. В соответствии с этим в проводах линии представляется система токов:

$$\left. \begin{aligned} I_a, \\ I_b = \alpha I_a, \\ I_c = \alpha^2 I_a, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

симметричные составляющие которой определяются как

$$\left. \begin{aligned} I_{a(n)}^{(1)} &= I_a \frac{m+2}{3}, \\ I_{a(n)}^{(2)} &= I_a \frac{m-1}{3}, \\ I_{a(n)}^{(0)} &= I_a \frac{m-1}{3}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Падения напряжений в фазах линии за счет нагрузочных токов (без учета токов проводимости линии) могут быть найдены как сумма соответствующих падений напряжений прямой и обратной последовательностей (падение напряжения нулевой последовательности не учитывается), т. е.

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_a &= \Delta U_a^{(1)} + \Delta U_a^{(2)}, \\ \Delta U_b &= \alpha \cdot \Delta U_a^{(1)} + \alpha^2 \cdot \Delta U_a^{(2)}, \\ \Delta U_c &= \alpha^2 \cdot \Delta U_a^{(1)} + \alpha \cdot \Delta U_a^{(2)}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

В свою очередь $\Delta U_a^{(1)}$ и $\Delta U_a^{(2)}$, согласно теории симметричных составляющих, определяются из соотношений:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U^{(1)}_a &= I_{a(n)}^{(0)} \cdot Z^{(1)} + I_{a(n)}^{(1)} \cdot Z^{(0)} + I_{a(n)}^{(2)} \cdot Z^{(2)}; \\ \Delta U^{(2)}_a &= I_{a(n)}^{(0)} \cdot Z^{(2)} + I_{a(n)}^{(1)} \cdot Z^{(1)} + I_{a(n)}^{(2)} \cdot Z^{(0)}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Здесь } Z^{(0)} &= \frac{Z^{(1)}_a + Z^{(1)}_b + Z^{(1)}_c}{3}, \\ Z^{(1)} &= \frac{Z^{(1)}_a + \alpha^2 Z^{(1)}_b + \alpha Z^{(1)}_c}{3}, \\ Z^{(2)} &= \frac{Z^{(1)}_a + \alpha Z^{(1)}_b + \alpha^2 Z^{(1)}_c}{3}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

причем сопротивления от взаимной индукции приняты одинаковыми для всех проводов.

Подставляя значения симметричных составляющих токов и сопротивлений из (9) и (12) в выражения (11), а также учитывая, что при транспозиции двух нижних проводов $Z^{(1)}_b = Z^{(1)}_c$, получим формулы для подсчета симметричных составляющих падения напряжения в фазе „а“ в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U^{(1)}_a &= \frac{1}{3} I_a (m Z^{(1)}_a + 2 Z^{(1)}_b), \\ \Delta U^{(2)}_a &= \frac{1}{3} I_a (m Z^{(1)}_a - Z^{(1)}_b). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Из (13) —

$$\Delta U_a = \Delta U^{(1)}_a + \Delta U^{(2)}_a = \frac{1}{3} I_a (2 m Z_a + Z_b). \quad (14)$$

При этом и в дальнейшем значки у сопротивлений токам прямой последовательности опущены.

Падение напряжения в фазе „b“

$$\Delta U_b = \alpha \cdot \Delta U^{(1)}_a + \alpha^2 \cdot \Delta U^{(2)}_a,$$

или, совмещая систему векторов токов и напряжений фазы „b“ и фазы „a“, получим

$$\alpha^2 \cdot \Delta U^{(1)}_b = \Delta U^{(1)}_a + \alpha \cdot \Delta U^{(2)}_a, \quad (15)$$

или

$$\alpha^2 \cdot \Delta U_b = (\Delta U^{(1)}_a - \frac{1}{2} \Delta U^{(2)}_a) - j \frac{\sqrt{3}}{2} \Delta U^{(2)}_a. \quad (16)$$

То же и для фазы „с“:

$$\Delta U_c = \alpha^2 \cdot \Delta U^{(1)}_a + \alpha \cdot \Delta U^{(2)}_a; \quad (17)$$

или

$$\alpha \cdot \Delta U_c = (\Delta U^{(1)}_a - \frac{1}{2} \Delta U^{(2)}_a) + j \frac{\sqrt{3}}{2} \Delta U^{(2)}_a. \quad (18)$$

IV.

В частном случае, когда в заземленной фазе нет проводов (рис. 4), $Z_a = \infty$, $m = 0$ и выражения (13) дают неопределенность. Чтобы избежать этой неопределенности, напишем выражение для произведения $m \cdot Z_a$. Согласно (7)

$$m Z_a = \frac{(Z^{(0)}_a - Z_a) \cdot Z_a}{3 Z_a + (Z^{(0)}_a - Z_a)};$$

в пределе, когда Z_a стремится к бесконечности,

$$m Z_a = \frac{Z^{(0)}_a - Z_a}{3} = \frac{Z^{(0)}_b - Z_b}{3}, \quad (19)$$

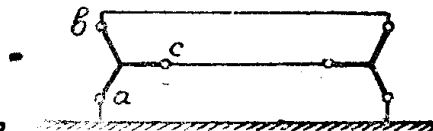


Рис. 4

так как разность $Z^{(0)}_a - Z_a$ — конечная величина и не зависит от активного сопротивления и радиуса провода.

После подстановки $m Z_a$ из (19) формулы (12) и (14) для подсчета падений напряжения в трехфазной линии с заземленной фазой, когда в заземленной фазе нет проводов, получают вид:

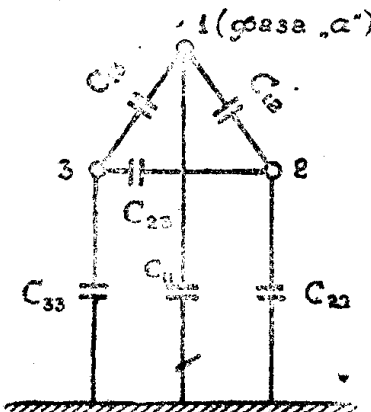


Рис. 5

$$\left. \begin{aligned} \Delta U^{(1)}_a &= \frac{1}{9} I_a (Z^{(0)}_b + 5 Z), \\ \Delta U^{(2)}_a &= \frac{1}{9} I_a (Z^{(0)}_b - 4 Z_b); \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\Delta U_a = \frac{1}{9} (2 Z^{(0)}_b + Z_b). \quad (21)$$

V.

Для целей подсчета емкостных токов в линии с заземленной фазой можно принять, что к линии подводится симметричная система напряжений. Применительно к рис. 5

заряды и потенциалы проводов трехфазной одноцепной линии связываются через частичные емкости C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{12} , C_{13} , и C_{23} уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= C_{11} \cdot U_{10} + C_{12} \cdot (U_{10} - U_{20}) + C_{13} (U_{10} - U_{30}), \\ q_2 &= C_{22} \cdot U_{20} + C_{12} (U_{20} - U_{10}) + C_{23} (U_{20} - U_{30}), \\ q_3 &= C_{33} \cdot U_{30} + C_{23} (U_{30} - U_{20}) + C_{13} (U_{30} - U_{10}). \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Имея в виду, что в линии с заземленной фазой

$$\begin{aligned} U_{10} &= U_a - U_a = 0, \\ U_{20} &= U_b - U_a = (\alpha - 1) \cdot U_a, \\ U_{30} &= U_c - U_a = (\alpha^2 - 1) U_a, \end{aligned}$$

из (22) найдем выражения для емкостных токов фаз линии:

$$\left. \begin{aligned} I_{a(c)} &= -(I_{b(c)} + I_{c(c)}) = j 3 (\omega C_{12} U_a + \omega C_{22} U_a), \\ I_{b(c)} &= \sqrt{3} [\omega C_{23} \cdot U_a + j \omega (C_{12} + C_{22}) \cdot U_a \angle -150^\circ], \\ I_{c(c)} &= \sqrt{3} [-\omega C_{23} \cdot U_a + j \omega (C_{13} + C_{33}) \cdot U_a \angle 150^\circ]. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Векторная диаграмма емкостных токов линии приведена на рис. 6.

Как и в отношении нагрузочного тока, выделяем m -ю часть емкостного тока заземленной фазы (фазы „а“), протекающую в проводе этой

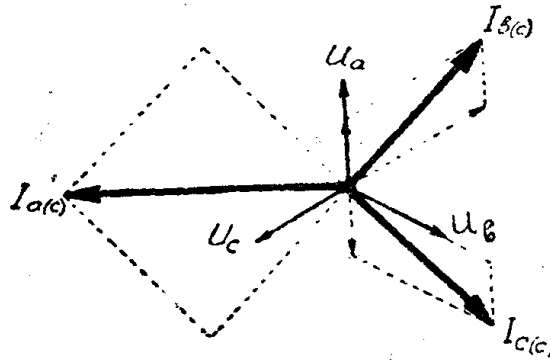


Рис. 6

фазы, и затем разлагаем несимметричную систему емкостных токов в проводах линии на симметричные составляющие:

$$\left. \begin{aligned} I_{a(c)(n)}^{(1)} &= (m + 1) (I_{c12} + I_{c22}) + I_{c23}, \\ I_{a(c)(n)}^{(2)} &= m (I_{c12} + I_{c22}) - I_{c23}, \\ I_{a(c)(n)}^{(0)} &= (m - 1) (I_{c12} + I_{c22}). \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

В выражениях (24) принято:

$$\left. \begin{aligned} I_{c12} &= j \omega C_{12} \cdot U_a, \\ I_{c22} &= j \omega C_{22} \cdot U_a, \\ I_{c23} &= j \omega C_{23} \cdot U_a, \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

и, имея в виду транспозицию проводов незаземленных фаз, $I_{c12} = I_{c13}$, $I_{c22} = I_{c33}$.

В соответствии с методикой, уже изложенной выше, при П-образной схеме замещения линии, получим падение напряжения в фазе „а“ за счет емкостного тока:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{a(c)}^{(1)} &= m Z_a \cdot (I'_{c12} + I'_{c22}) + Z_b (I'_{c12} + I'_{c22} + I'_{c23}); \\ \Delta U_{a(c)}^{(2)} &= m Z_a (I'_{c12} + I'_{c22}) - Z_b I'_{c23}; \\ \Delta U_{a(c)} &= \Delta U_{a(c)}^{(1)} + \Delta U_{a(c)}^{(2)} = (2 m Z_a + Z_c) (I'_{c12} + I'_{c22}); \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

причем

$$I_{c12} = \frac{I_{c12}}{2}, \quad I_{c22} = \frac{I_{c22}}{2} \text{ и } I_{c23} = \frac{I_{c23}}{2}.$$

Падение напряжения в фазах „b“ и „с“ за счет емкостных токов может быть найдено через симметричные составляющие падения напряжения в фазе „a“:

$$\left. \begin{aligned} \alpha^2 \Delta U_{b(c)} &= \left(\Delta U_{a(c)}^{(1)} - \frac{1}{2} \Delta U_{a(c)}^{(2)} \right) - j \frac{\sqrt{3}}{2} \Delta U_{a(c)}^{(2)} \\ \alpha \Delta U_{c(c)} &= \left(\Delta U_{a(c)}^{(1)} - \frac{1}{2} \Delta U_{a(c)}^{(2)} \right) + j \frac{\sqrt{3}}{2} \Delta U_{a(c)}^{(2)} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Полное падение напряжения в каждой фазе (за вычетом составляющей нулевой последовательности) будет получено как сумма падений напряжения за счет нагрузочного и емкостного токов.

Для двухпроводной трехфазной линии с заземленной фазой, рис. 4, $I_{c12} = 0$, и емкостные токи в фазах поэтому, согласно (23), подсчитываются как

$$\left. \begin{aligned} I_{b(c)} &= \sqrt{3} (\omega C_{23} U_a + \omega C_{22} U_a \angle -60^\circ), \\ I_{c(c)} &= \sqrt{3} (-\omega C_{23} U_a + \omega C_{22} U_a \angle -120^\circ), \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

причем

$$C_{23} = \frac{-a_{23}}{a_{22}^2 - a_{23}^2} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^6} \frac{F}{\text{km}}, \quad (29)$$

и

$$C_{22} = \frac{1}{a_{22} + a_{23}} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^6} \frac{F}{\text{km}}, \quad (30)$$

где

$$a_{23} = 21 \ln \frac{h_{23}}{D_{23}}, \quad a_{22} = \frac{h_{22}}{r}, \quad \text{рис. 7.}$$

Падения напряжения в фазе „a“ за счет емкостного тока, имея в виду, что

$$m Z_a = \frac{Z_b^{(0)} - Z_b}{3},$$

из (26) получаются

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{a(c)}^{(1)} &= \frac{1}{3} \left[Z_b^{(0)} I'_{c21} + Z_b (2 I'_{c22} + 3 I'_{c23}) \right], \\ \Delta U_{a(c)}^{(2)} &= \frac{1}{3} \left[Z_b^{(0)} I'_{c22} - Z_b (I'_{c22} + 3 I'_{c23}) \right]; \\ \Delta U_{a(c)} &= \Delta U_{a(c)}^{(1)} + \Delta U_{a(c)}^{(2)} = \frac{1}{3} (2 Z_b^{(0)} + Z_b) \cdot I'_{c22}. \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

VI.

„Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей“ допускают несимметрию токов в генераторах в 10%, что эквивалентно наличию составляющей тока обратной последовательности в размере немного более 5%. Поэтому электрический расчет несимметричной электропередачи должен предусматривать обязательную проверку величины асимметрии токов в элементах эл. системы, питающей несимметричные электропередачи.

Ток обратной последовательности в последовательной эл. цепи можно определить, если сопротивления фаз одинаковы, как

$$I^{(2)} = \frac{\Sigma U^{(2)}}{\Sigma Z^{(2)}},$$

и, в свою очередь, напряжение обратной последовательности, как

$$\Sigma U^{(2)} = E^{(2)} - \Sigma \Delta U^{(2)} = 0 - \Sigma \Delta U^{(2)} = - \Sigma \Delta U^{(2)}.$$

Падение напряжения обратной последовательности в линии определяется по формулам (13), (20), (26) и (31) в зависимости от того, учитывается ли емкостный ток в расчете линии и есть ли провода в заземленной фазе. Падение напряжения обратной последовательности в трансформаторах, генераторах и симметричных линиях за счет несимметричной системы емкостных токов линии с заземленной фазой может быть найдено как:

$$\Delta U_T^{(2)} = I_{T(c)}^{(2)} \cdot Z_T^{(2)}, \Delta U_G^{(2)} = I_{G(c)}^{(2)} \cdot Z_G^{(2)} \text{ и т. д.,}$$

где $I_{T(c)}^{(2)}$, $I_{G(c)}^{(2)}$ и т. д. — токи обратной последовательности в трансформаторах, генераторах и т. д. за счет несимметричной системы емкостных токов линии с заземленной фазой; составляющая обратной последовательности емкостного тока в фазе „а“ линии с заземленной фазой (ток в проводе + ток в земле) —

$$I_{a(c)}^{(2)} = \frac{I_{a(c)} + \alpha I_{b(c)} + \alpha^2 I_{c(c)}}{3} = I_{c12} + I_{c22} - I_{c23}. \quad (32)$$

Ток $I_{a(c)}^{(2)}$ протекает в генераторах и трансформаторах, включенных между генераторами и линией с заземленной фазой, и создает падения напряжения обратной последовательности.

Таким образом, при подсчете полного тока обратной последовательности в любом элементе системы нужно учесть не только ток, определенный как

$$I^{(2)} = \frac{\Sigma U^{(2)}}{\Sigma Z^{(2)}},$$

но и емкостный ток обратной последовательности, если он имеет место в данном элементе системы.

Сопротивления обратной последовательности генераторов и трансформаторов обычно известны. Сопротивления фаз линии с заземленной фазой неодинаковы и поэтому, строго рассуждая, нужно было бы учесть появление и токов прямой последовательности при приложении напряжения обратной последовательности к линии, но это весьма усложнило бы решение задачи. С практической точки зрения точность решения почти не страдает, если принять, в данном случае, что сопротивления в фазах линии токам прямой и обратной последовательности одинаковы и равны $Z_b = Z_c$.

Сказанное выше о подсчете тока обратной последовательности в элементах электропередачи (эл. системы) иллюстрируется схемой рис. 8, в которой

$$I_1^{(2)} = I_T^{(2)} = I_c^{(2)} + \frac{U_r^{(2)} + U_T^{(2)} + U_A^{(2)}}{Z_r^{(2)} + Z_T^{(2)} + Z_A^{(2)} + Z_T^{(2)} + Z_H^{(2)}}.$$

$Z_H^{(2)}$ — сопротивление нагрузки токам обратной последовательности, если нет более точных данных, может быть принято равным $\sim (15 - 20) + j(40 - 45) \%$. В случае сложной замкнутой системы распределение токов обратной последовательности удобно находить методом собственных и взаимных импеданцев.

VII.

Во многих случаях достаточно определить только т. н. продольную составляющую падения напряжения, которую затем можно приравнять потере напряжения. Ниже даны необходимые формулы для определения

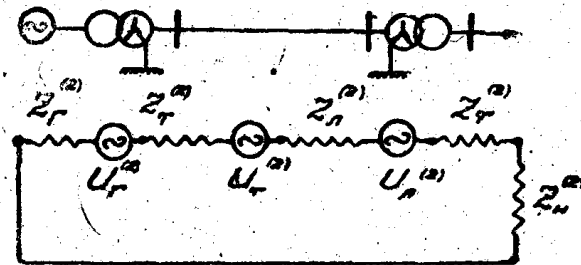


Рис. 8

продольной составляющей падения напряжения в линии, причем в этих формулах принято:

$$m Z_a = R'_a + jX'_a; Z_b = R_b + jX_b; I_a = \frac{P_2 - jQ_2}{\sqrt{3} U_2}.$$

а) Без учета емкостных токов линии:
В фазе „а“ (заземлена) из (13)

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{3} \Delta U_{a(\text{прод})}^{(1)} &= \frac{1}{3} \cdot \frac{P_2 (R'_a + 2R_b) + Q_2 (X'_a + 2X_b)}{U_2}, \\ \sqrt{3} \Delta U_{a(\text{прод})}^{(2)} &= \frac{1}{3} \cdot \frac{P_2 (R'_a - R_b) + Q_2 (X'_a - X_b)}{U_2}, \\ \sqrt{3} \Delta U_{a(\text{прод})} &= \frac{1}{3} \cdot \frac{P_2 (2R'_a + R_b) + Q_2 (2X'_a + X_b)}{U_2}. \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

В фазе „b“ из (16)

$$\begin{aligned} \sqrt{3} \Delta U_{b(\text{прод})} &= \sqrt{3} \left(\Delta U_{a(\text{прод})}^{(1)} - \frac{1}{2} \Delta U_{a(\text{прод})}^{(2)} \right) + \\ &+ \frac{1}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{P_2 (X'_a - X_b) - Q_2 (R'_a - R_b)}{U_2}. \end{aligned} \quad (34)$$

В фазе „с“ из (18)

$$\begin{aligned} \sqrt{3} \Delta U_{c(\text{прод})} &= \sqrt{3} \left(\Delta U_{a(\text{прод})}^{(1)} - \frac{1}{2} \Delta U_{a(\text{прод})}^{(2)} \right) - \\ &- \frac{1}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{P_2 (X'_a - X_b) - Q_2 (R'_a - R_b)}{U_2}. \end{aligned} \quad (35)$$

Когда в заземленной фазе нет проводов, (рис. 4), в соответствии с (20) и (21)

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{3} \Delta U_{a(\text{прод})}^{(1)} &= \frac{1}{9} \cdot \frac{P_2 (R_b^{(0)} + 5R_b) + Q_2 (X_b^{(0)} + 5X_b)}{U_2}, \\ \sqrt{3} \Delta U_{a(\text{прод})}^{(2)} &= \frac{1}{9} \cdot \frac{P_2 (R_b^{(0)} - 4R_b) + Q_2 (X_b^{(0)} - 4X_b)}{U_2}, \\ \sqrt{3} \Delta U_{a(\text{прод})} &= \frac{1}{9} \cdot \frac{P_2 (2R_b^{(0)} + R_b) + Q_2 (2X_b^{(0)} + X_b)}{U_2}. \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

$$\sqrt{3} \Delta U_{b(\text{прод})} = \sqrt{3} \left(\Delta U_{a(\text{прод})}^{(1)} - \frac{1}{2} \Delta U_{a(\text{прод})}^{(2)} \right) + \frac{1}{6\sqrt{3}} \cdot \frac{P_2(X_b^{(0)} - 4X_b) - Q_2(R_b^{(0)} - 4R_b)}{U_2}; \quad (37)$$

$$\sqrt{3} \Delta U_{c(\text{прод})} = \sqrt{3} \left(\Delta U_{a(\text{прод})}^{(1)} - \frac{1}{2} \Delta U_{a(\text{прод})}^{(2)} \right) - \frac{1}{6\sqrt{3}} \cdot \frac{P_2(X_b^{(0)} - 4X_b) - Q_2(R_b^{(0)} - 4R_b)}{U_2}. \quad (38)$$

б) За счет емкостных токов продольные составляющие падений напряжения в линии:

В фазе „а“, согласно (26),

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{a(c)(\text{прод})}^{(1)} &= -[X'_a(I'_{c12} + I'_{c22}) + X_b(I'_{c12} + I'_{c22} + I'_{c23})], \\ \Delta U_{a(c)(\text{прод})}^{(2)} &= -[X'_a(I'_{c12} + I'_{c22}) - X_b I_{c23}], \\ \Delta U_{a(c)(\text{прод})} &= -[(2X'_a + X_b)(I'_{c12} + I'_{c22})]. \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

В фазах „b“ и „с“, согласно 27,

$$\begin{aligned} \Delta U_{b(c)(\text{прод})} &= \Delta U_{a(c)(\text{прод})}^{(1)} - \frac{1}{2} \Delta U_{a(c)(\text{прод})}^{(2)} + \\ &+ \frac{\sqrt{3}}{2} [R'_a(I'_{c12} + I'_{c22}) - R_b I_{c23}]; \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{c(c)(\text{прод})} &= \Delta U_{a(c)(\text{прод})}^{(1)} - \frac{1}{2} \Delta U_{a(c)(\text{прод})}^{(2)} - \\ &- \frac{\sqrt{3}}{2} [R'_a(I'_{c12} + I'_{c22}) - R_a I_{c23}]. \end{aligned} \quad (41)$$

В случаях отсутствия проводов в заземленной фазе, рис. 4, согласно (31), —

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{a(c)(\text{прод})}^{(1)} &= \frac{1}{3} [(X_b^{(0)} + 2X_b)I'_{c22} + 3X_b I'_{c23}], \\ \Delta U_{a(c)(\text{прод})}^{(2)} &= \frac{1}{3} [(X_b^{(0)} - X_b)I'_{c22} - 3X_b I'_{c23}], \\ \Delta U_{a(c)(\text{прод})} &= \frac{1}{3} (2X_b^{(0)} + X_b)I'_{c22}. \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

VIII.

Корона на линиях с заземленной фазой с количественной стороны проявляет себя иначе, чем в симметричных линиях, и поэтому требуются иные соотношения для учета короны в электр. расчете линий с заземленной фазой.

В практических расчетах принято полагать электрическое поле вокруг проводов линий равномерным. На этом основании связь между напряженностью эл. поля и зарядом на проводе можно написать в виде

$$E = \frac{q}{2\pi r},$$

где r — радиус провода. Так как, с другой стороны,

$$q = C_{\text{раб}} \cdot U_{\text{ф}},$$

то

$$U_{\phi} = 2\pi \cdot \frac{\Gamma}{C_{\text{раб}}} \cdot E.$$

Критической разрушающей напряженности поля будет соответствовать критическое напряжение

$$U_{\text{кр(ф)}} = 2\pi \cdot \frac{\Gamma}{C_{\text{раб}}} \cdot E_{\text{кр}}.$$

и если взять по Пика $E_{\text{кр}} = 21,1 \delta$ (δ — плотность воздуха), Γ подставить в сантиметрах, $C_{\text{раб}}$ — в фарадах на километр, ввести коэффициенты, учитывающие состояние погоды — m_n , поверхности провода — m_0 и переход к практическим единицам измерений — $8,84 \cdot 10^{-6}$, то мы получим расчетную формулу для критического напряжения короны в следующем виде:

$$\begin{aligned} U_{\text{кр(ф)}} &= m_0 \cdot m_n \cdot \delta \cdot 8,84 \cdot 10^{-6} \cdot 2\pi \cdot \frac{\Gamma}{C_{\text{раб}}} \cdot 10^{-3} = \\ &= m_0 \cdot m_n \cdot \delta \cdot 1,17 \frac{\Gamma}{C_{\text{раб}}} \cdot 10^{-6} \text{ kV.} \end{aligned} \quad (43)$$

Формула (43) одинаково пригодна и для симметричной линии и для линии с заземленной фазой. Рабочую емкость незаземленных проводов линии с заземленной фазой можно подсчитать по следующей формуле, полученной из отношения (22):

$$C_{\text{раб}} = \frac{1}{2} \sqrt{9(C_{12} + C_{22})^2 + 3(C_{12} + C_{22} + C_{23})^2}. \quad (44)$$

Подсчеты рабочих емкостей для конкретных примеров высоковольтных линий электропередач показывают, что при прочих равных условиях рабочая емкость незаземненных проводов линии с заземленной фазой больше рабочей емкости проводов симметричной линии на 24 — 32%, в случае одноцепных линий; и на 15 — 25% в случае двухцепных линий. Следовательно, согласно (43), в таком же отношении критическое напряжение короны проводов линии с заземленной фазой ниже, чем в случае симметричных линий, что вызывает затруднения в использовании в линиях с заземленной фазой проводов АС-95, в случае одноцепных линий и АС-70, в случае двухцепных линий.

Потери мощности на корону в линии обычно подсчитывают по формуле Пика

$$P_{\text{кор}} = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{\Gamma}{\delta}} (U - U_{\text{кр}})^2 \cdot 10^{-5} \text{ kw/km.}$$

Эта формула, являясь экспериментальной, не указывает прямо на механизм образования потерь на корону. Однако, по целому ряду соображений, на которых в этой краткой статье нет возможности останавливаться, а также используя рассуждения Хольма по этому вопросу, можно прийти к заключению, что потери на корону в линии пропорциональны зарядам проводов линии при прочих неизменных условиях. Это положение было частично проверено автором опытом на одной лабораторной линии; экспериментальные результаты близко совпали с подсчитанными (ЛЗ). Поэтому можно рекомендовать для подсчета потерь на корону в проводах линии с заземленной фазой использовать формулу Пика, дополнив ее множителем в виде отношения

$$\frac{C_{\text{раб(несимм)}}}{C_{\text{раб(симм)}}} = \frac{C'_p}{C_p},$$

где C_p и C_p — рабочие емкости соответственно несимметричной и симметричной линии при одинаковых размерах линий.

Рабочая емкость симметричной трехфазной линии

$$C_p = C_{22} + 3C_{11}.$$

IX.

Пример эл. расчета электропередачи с заземленной фазой (рис. 9.)

Вариант 1: заземленная фаза имеет провода $2 \times \text{АС-95}$. Сопротивления фаз линии:

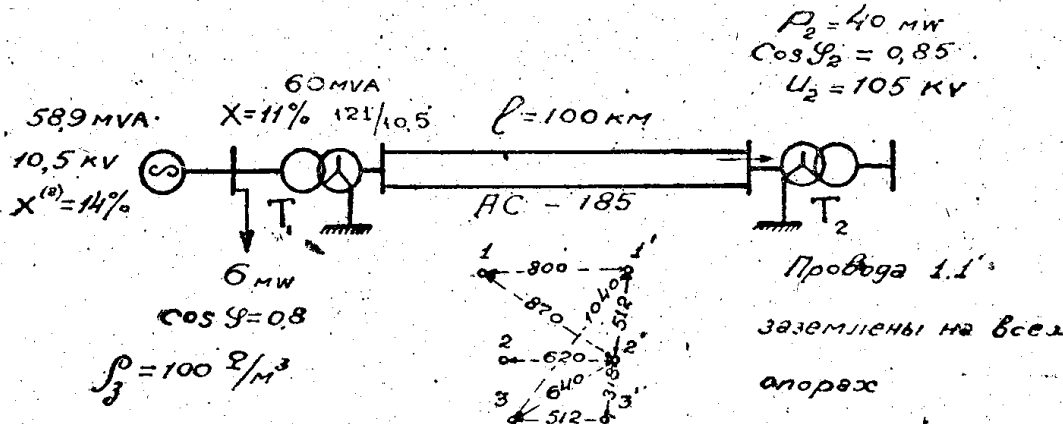


Рис. 9

$$Z_a = R_a + jX_a = \frac{1}{2} \cdot 100 (0,310 + j 0,450) = 15,5 + j 22,5 \Omega;$$

$$Z_b = R_b + jX_b = \frac{1}{2} \cdot 100 (0,165 + j 0,42) = 8,25 + j 21,0 \Omega.$$

При $\rho_3 = 100 \Omega/\text{m}$ $D_e \approx 1000 \text{ м}$, и по формуле (5)

$$Z_a^{(0)} = \frac{1}{2} \cdot 100 (0,310 + 6 \cdot 0,0493 + j 2,28) = 30,3 + j 114 \Omega.$$

Доля тока в проводах заземленной фазы (фаза „а“) по (7)

$$m = \frac{Z_a^{(0)} - Z_a}{3Z_a + (Z_a^{(0)} - Z_a)} = \frac{(30,3 + j 114,0) - (15,5 + j 22,5)}{3(15,5 + j 22,5) + 14,8 + j 91,5} = 0,553 \angle 12^\circ 15'.$$

$$mZ_a = R'_a + jX'_a = 0,553 \angle 12^\circ 15' \cdot (15,5 + j 22,5) = 15,1 \angle 67^\circ 15' = 5,82 + j 13,9 \Omega.$$

Из максвелловских потенциальных уравнений (см. любой курс теор. основ. электротехники) найдем определители и соответствующие миноры, по которым уже просто определяются частичные емкости линии:

$$C_{12} = C_{13} = 0,00154 \cdot 10^{-6} \text{ F/km},$$

в предположении, что незаземленные провода транспонированы,

$$C_{22} = C_{33} = 0,00343 \cdot 10^{-6} \text{ F/km},$$

$$C_{12} = 0,00170 \cdot 10^{-6} \text{ F/km};$$

и частичные емкостные токи:

$$I_{c12} = j 2.100.314. 0,00154. 10^{-6} \cdot \frac{110}{3} = j 0,0062 \text{ kA},$$

$$I_{c22} = j 0,0137 \text{ kA},$$

$$I_{c23} = 0,0068 \text{ kA}.$$

Симметричные составляющие системы емкостных токов получим, согласно (24):

$$I_{a(c)}^{(1)} = 2(I_{c12} + I_{c22}) + I_{c23} = j 0,0268 \text{ kA},$$

$$I_{a(c)}^{(2)} = (I_{c12} + I_{c22} - I_{c23}) = j 0,0131 \text{ kA}.$$

Найдем падения напряжения в фазах линий. В соответствии с (13) и (26) при П-образной схеме замещения линии,—

$$\begin{aligned} \Delta U_a^{(1)} &= \frac{1}{3} I_a (mZ_a + 2Z_b) + [mZ_a (I'_{c12} + I'_{c22}) + Z_b (I'_{c12} + I'_{c22} + I'_{c23})] = \\ &= \frac{1}{3} \cdot \frac{40(0,85 - j 0,52)}{0,85 \cdot \sqrt{3} \cdot 105} (5,82 + j 13,9 + 2,8,25 + j 2,21) + \\ &+ \left[(5,82 + j 13,9) \cdot \frac{1}{2} (0,0062 + 0,0137) + (8,25 + j 21,0) \cdot \frac{1}{2} (0,0062 + \right. \\ &\left. + 0,0137 + 0,0068) \right] = (4,15 + j 3,33) + (-0,42 + j 0,17) = 3,73 + j 3,50 \text{ kV}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_a^{(2)} &= \frac{1}{3} I_a (mZ_a - Z_b) + [mZ_a (I'_{c12} + I'_{c22}) - Z_b \cdot I'_{c23}] = \\ &= (-0,50 - j 0,41) + (-0,03 + j 0,02) = \\ &= -0,53 - j 0,39 \text{ kV}; \end{aligned}$$

падения напряжения в заземленной фазе—

$$\Delta U_a = \Delta U_a^{(1)} + \Delta U_a^{(2)} = 3,20 + j 3,11 \text{ kV};$$

падения напряжения в незаземленных фазах:.

$$\begin{aligned} \alpha^2 \Delta U_b &= \Delta U_a^{(1)} + \frac{1}{2} \Delta U_a^{(2)} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \Delta U_a^{(2)} = (3,73 + j 3,50) - \\ &- \frac{1}{2} (-0,53 - j 0,39) - j \frac{\sqrt{3}}{2} (-0,53 - j 0,39) = \\ &= 3,66 + j 4,16 \text{ kV}; \end{aligned}$$

$$\alpha \Delta U_c = \Delta U_a^{(1)} - \frac{1}{2} \Delta U_a^{(2)} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \Delta U_a^{(2)} = 4,34 + j 3,24 \text{ kV}.$$

Падение напряжения в трансформаторе T_1 и генераторе за счет несимметричной системы емкостных токов:

$$\Delta U_{aT}^{(1)} = Z_T \cdot I_{a(c)}^{(2)} = (1,57 + j 27) \cdot j 0,0268 \approx -0,724 \text{ kV};$$

$$\Delta U_{aT}^{(2)} = Z_T \cdot I_{a(c)}^{(1)} = (1,57 + j 27) \cdot j 0,0131 \approx -0,445 \text{ kV};$$

$$\Delta U_{aT} = (-0,724) + (-0,354) = -1,078 \text{ kV};$$

$$\alpha^2 \Delta U_{aT} = \Delta U_{aT}^{(1)} - \frac{1}{2} \Delta U_{aT}^{(2)} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \Delta U_{aT}^{(2)} = -0,547 + j0,306 \text{ kV};$$

$$\alpha \Delta U_{cT} = \Delta U_{aT}^{(1)} - \frac{1}{2} \Delta U_{aT}^{(2)} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \Delta U_{aT}^{(2)} = -0,547 - j0,306 \text{ kV};$$

$$\Delta U_{aT}^{(1)} = Z_T \cdot I_{a(c)}^{(1)} \approx j34,7 \cdot j0,0268 = -0,93 \text{ kV};$$

$$\Delta U_{aT}^{(2)} Z_T I_{a(c)}^{(2)} \approx j34,7 \cdot j0,0131 = -0,455 \text{ kV}.$$

Имея в виду, что в генераторах $Z_T^{(2)}$ составляет, примерно, десятую долю от $Z_T^{(1)}$ (синхронный реактанс), а $I_T^{(1)}$ в десятки раз больше $I_T^{(2)}$, нет смысла в практических расчетах учитывать в генераторах падение напряжения обратной последовательности; можно считать, что на клеммах генератора имеет место симметричная система напряжений в фазах.

Ток обратной последовательности в генераторе по причине несимметрии напряжения фаз электропередачи находим из схемы замещения электропередачи (рис. 10). В этой схеме указаны напряжения обратной

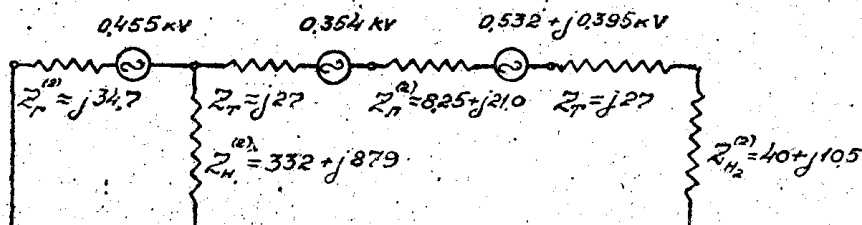


Рис. 10

последовательности элементов электропередачи, подсчитанные выше, и сопротивления токам обратной последовательности. Из схемы находим ток в генераторе, равный

$$3,15 - j5,58 \text{ A},$$

причем сопротивление обратной последовательности нагрузок принято равным $Z_H = (17 + j45) \%$.

Полный ток обратной последовательности в генераторе, с учетом емкостного тока линии,

$$I_T^{(2)} = 3,15 - j5,58 + j0,0131 \cdot 10^3 = 3,15 + j7,52 = 8,17 \angle \text{A}.$$

Асимметрии токов в генераторе—

$$\frac{I_T^{(2)}}{I_T^{(1)}} 100 \approx \frac{I_T^{(2)}}{I_{(H)}} 100 = \frac{8,17 \cdot \sqrt{3} \cdot 121 \cdot 100}{58,9 \cdot 10^3} = 2,91\%.$$

Вариант 2: заземленная фаза не имеет проводов.

В этом случае $mZ_a = \frac{1}{3} (Z_b^{(0)} - Z_b)$;

$$Z_b^{(0)} = \frac{1}{2} (8,25 + 100 \cdot 0,0493 + j2,25) = 23 + j112,5 \Omega.$$

Частичные емкости—

$$C_{22} = \frac{1}{(a_{22} + a_{22}') + (a_{23} + a_{23}')} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^6} = 0,00428 \cdot 10^{-6} \text{ F/km},$$

$$C_{23} = - \frac{-(a_{23} + a_{23}')}{(a_{22} + a_{22}')^2 - (a_{23} + a_{23}')^2} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^6} = 0,00263 \cdot 10^{-6} \text{ F/km.}$$

Частичные емкостные токи—

$$I_{c23} = j 0,0102 \text{ kA}, I_{c22} = j 0,0171 \text{ kA}.$$

Симметричные составляющие системы емкостных токов:

$$I_{a(a)}^{(1)} = j 0,0444 \text{ kA}, I_{a(c)}^{(2)} = j 0,0069 \text{ kA}.$$

Падения напряжения в фазах линии в соответствии с (20) и (31) при П-образной схеме замещения линии—

$$\begin{aligned} \Delta U_a^{(1)} &= \frac{1}{9} I_a (Z_b^{(0)} + 5Z_b) + \left[\frac{1}{3} (Z_b^{(0)} - Z_b) \cdot I_{c22} + Z_b (I_{c23} + I_{c22}) \right] = \\ &= \frac{1}{9} (0,220 - j 0,135)(23 + j 112,5 + 5 \cdot 8,25 + j 5 \cdot 21,0) + \\ &+ j (23,0 + j 112,5 - 8,25 - j 21,0) \cdot j 0,0171 + (8,25 + j 21,0) \cdot j (0,0171 + 0,0102) = \\ &= 3,78 + j 4,66 \text{ kV}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_a^{(2)} &= \frac{1}{9} \cdot I_a (Z_b^{(0)} - 4Z_b) + \left[\frac{1}{3} (Z_b^{(0)} - Z_b) \cdot I_{c22} - Z_b \cdot I_{c23} \right] = \\ &= -0,124 + j 0,845 \text{ kV}; \end{aligned}$$

$$\Delta U_a = 3,66 + j 5,59 \text{ kV};$$

$$\alpha^2 \Delta U_b = 4,57 + j 4,34 \text{ kV};$$

$$\alpha \Delta U_c = 3,01 + j 4,13 \text{ kV}.$$

Падение напряжения в трансформаторе за счет емкостных токов—

$$U_{a(c)}^{(1)} = Z_T \cdot I_{a(c)}^{(1)} \approx j 27 \cdot j 0,044 = -1,24 \text{ kV};$$

$$U_{a(c)}^{(2)} = Z_T \cdot I_{a(c)}^{(2)} \approx j 27 \cdot j 0,0069 = -0,186 \text{ kV}.$$

Падение напряжения обратной последовательности в генераторе—

$$\Delta U_{a(c)}^{(2)} = Z_p \cdot I_{a(c)}^{(2)} \approx j 34,7 \cdot j 0,0069 = -0,24 \text{ kV}.$$

Аналогично первому варианту найдем ток обратной последовательности в генераторе—

$$I_r^{(2)} = -3,1 + j 3,7 \text{ A};$$

$$\frac{I_r^{(2)}}{I_r^{(1)}} 100 = 1,7\%.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. В. К. Щербаков.— Линии с использованием провода одной из фаз и в качестве защиты от грозных ударов. Известия Томского индустриального института. Т. 59, 1941 г.
3. Инж. Л. Е. Эбин и инж. Ш. М. Алукер, — Руководство по электрическому расчету трехфазных сетей с использованием земли в качестве одного из проводов. Изд. НКЗема СССР, 1940 г.
3. В. К. Щербаков.— Корона на линиях с заземленной фазой. Известия Томского политехнического института, т. 63.